



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Off nl ungungsschrift
10 DE 199 19 832 A 1

51 Int. Cl.7:
H 01 L 21/3065

21 Aktenzeichen: 199 19 832.2
22 Anmeldetag: 30. 4. 1999
43 Offenlegungstag: 9. 11. 2000

DE 199 19 832 A 1

71 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:
Laermer, Franz, Dr., 70437 Stuttgart, DE; Schilp,
Andrea, 73525 Schwäbisch Gmünd, DE

56 Entgegenhaltungen:

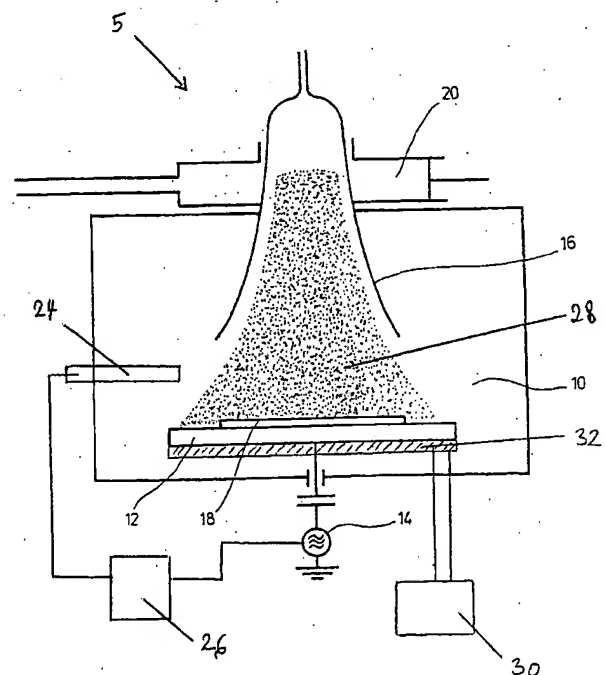
DE	197 30 644 C1
DE	42 41 045 C1
DE	37 06 127 C2
DE	40 10 672 A1
US	54 76 807
EP	7 29 175 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Halbleitern

57 Es wird ein Verfahren zum anisotropen Ätzen von Strukturen in einem Halbleiterkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einem Siliziumkörper (18), mittels eines Plasmas (28) vorgeschlagen. Dabei wird an den Halbleiterkörper zumindest während eines über eine vorgegebene Zeitdauer andauernden Ätzschrittes eine Ionenbeschleunigungsspannung angelegt, die insbesondere über eine hochfrequente Wechselspannung induziert wird. Die Zeitdauer des Ätzschrittes ist weiter in mindestens zwei Ätzabschnitte unterteilt, zwischen denen die angelegte Ionenbeschleunigungsspannung jeweils verändert wird. Bevorzugt sind zwei Ätzabschnitte vorgesehen, wobei während des ersten Ätzabschnittes eine höhere Beschleunigungsspannung verwendet wird als während des zweiten Ätzschrittes. Die Länge des ersten Ätzabschnittes kann weiter dynamisch oder statisch während der Ätzschritte mittels einer Vorrichtung zur Detektion eines Polymerdurchbruchs bestimmt werden. Zur Erzeugung und Einstellung der Höhe der Beschleunigungsspannung werden weiter bevorzugt hochfrequente Impulse bzw. Impulspakete mit einstellbarem Impuls-Pause-Verhältnis eingesetzt.



DE 199 19 832 A 1

Beschreibung

Stand der Technik

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum anisotropen Ätzen von Strukturen in einem Halbleiterkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einem Siliziumkörper, mittels eines Plasmas nach der Gattung des Hauptanspruches.

Stand der Technik

Aus DE 42 41 045 C1 ist ein Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Silizium bekannt. Dabei wechseln sich sogenannte Passivier- und Ätzschritte einander ab, wobei während der Passivierschritte Polymermaterial auf den freigeätzten Strukturen abgeschieden wird und während der Ätzschritte Fluorradikale aus einem Fluorlieferanten im Plasma freigesetzt werden, welche Silizium an sich isotrop ätzen. Durch einen gerichteten Ioneneinfall während der Ätzschritte, der den Ätzgrund der geätzten Strukturen bombardiert, wird weiter zu Beginn eines jeden Ätzschrittes zunächst ein Durchbruch des im vorausgehenden Passivierschritt erzeugten Ätzgrundpolymers vollzogen.

Während der an sich isotropen Ätzschritte wird weiter eine lokale Anisotropie dadurch erreicht, daß der Anteil der schräg einfallenden Ionen, welche die Seitenwand der Strukturen treffen, ein Vorwärtssputtern, d. h. einen Abtrag und eine Redeposition des Seitenwandpolymerfilms hin zu tieferen Teilen des erzeugten Trenchgrabens während der Ätzung bewirken, so daß beim Weiterätzen die Seitenwände stets von einem Schutzfilm passiviert bleiben und vor dem Ätzangriff der isotrop agierenden Fluorchemie geschützt sind.

Insgesamt muß dazu die während der Ätzschritte benötigte Ionenenergie, die über eine durch Hochfrequenzleistungseinspeisung erzeugte Beschleunigungsspannung an der Substratelektrode bzw. dem zu ätzenden Siliziumwafer hervorgerufen wird, ausreichen, um einen Durchbruch der Ätzgrundpassivierung zu Beginn eines jeden Ätzschrittes zu gewährleisten, und daneben den Ätzgrund während der Ätzschrittes von Polymer freizuhalten und den Seitenwandpolymerfilmtransportmechanismus aufrechtzuerhalten. Dies wird in DE 42 41 045 C1 durch eine relativ niedrige Ionenenergie von 10 bis 50 eV erreicht, die während der gesamten Dauer der Ätzschritte angelegt wird.

Infolge der konstanten Ionenbeschleunigung ergibt sich weiter eine feste Selektivität zwischen dem Seitenwandfilmabtrag und dem Abtrag des Ätzgrundpolymers, wobei die Dauer eines jeden Ätzschrittes weiter dadurch limitiert ist, daß der Großteil des Seitenwandpolymerfilms während der Ätzschritte abgetragen, d. h. vorwärtsgesputtert worden ist. Dieser muß daher durch einen erneuten Passivierschritt regelmäßig reinstalled werden, was letztlich auch die erreichbaren Ätzraten beschränkt, da die Passivierpausen eine Unterbrechung des Ätzfortschrittes darstellen. Wird mit zu wenig Passivierung prozessiert, leidet im übrigen die Anisotropie der Ätzung und es kommt im Bereich dielektrischer Grenzflächen d. h. beispielsweise beim Ätzstopp der Siliziumätzung auf einer Ätzstoppschicht, zur Ausbildung von lateralen Taschen, dem sogenannten "Notching-Phänomen".

In der unveröffentlichten Anmeldung DE 198 41 964.3 ist bereits vorgeschlagen worden, eine Plasmaätzanlage mit einer Vorrichtung zur Kühlung eines Siliziumkörpers während eines anisotropen Ätzprozesses zu versehen. Schließlich ist aus der Anmeldung DE 197 30 644.9 bereits bekannt, die Konzentration von Fluoratomen oder -ionen in einem Plasma mittels eines optischen Emissionspektrometers

und einer nachgeschalteten Auswerteeinheit zu bestimmen.

Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren mit den kennzeichnenden Merkmalen des Hauptanspruches hat gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil, daß damit eine Anpassung der Intensität der effektiven Ionenbeschleunigung zwischen Plasma und Substratelektrode an die physikalisch-chemischen Abläufe während der Ätzschritte und bei Bedarf auch während der Polymerisationsschritte ermöglicht wird, so daß der Seitenwandpolymerfilm dem Ätzschritt länger standhalten kann. Dies hat zur Folge, daß in den Ätzschritten länger geätzt werden kann und die Unterbrechungen durch Passivierschritte seltener werden, d. h. erst in größeren Zeitabständen erforderlich sind. Somit wird vorteilhaft eine insgesamt höhere Ätzrate erreicht.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

So wird vorteilhaft die Maskenselektivität dadurch verbessert, daß nur in den initialen Ätzgrundpolymerdurchbruchphasen mit hoher Ionenbeschleunigungsspannung geätzt wird, während über die restliche Dauer der Ätzschritte mit einer über eine reduzierte Spannung erzeugten reduzierten Ionenbeschleunigung nur noch der Ätzgrund von Polymermaterial freigehalten und der Seitenwandfilmtransportmechanismus aufrechterhalten werden muß.

Schließlich wird auch die Anisotropie des Ätzprozesses, insbesondere hinsichtlich des erzielten vertikalen Profils, verbessert, da die Passivierung der Seitenwände effektiver ist und die Prozeßparameter so optimiert werden können, daß die jeweils exakt richtige Polymermenge abgetragen und redeponiert, also durch den über die anliegende Spannung induzierten Ioneneinfall vorwärtsgesputtert wird.

Vorteilhaft ist weiterhin, daß durch eine während der Ätzschritte zeitweilig verminderte hochfrequente Wechselspannung oder eingekoppelte Hochfrequenzleistung, die mit einer verminderten Ionenbeschleunigungsspannung verbunden ist, das Seitenwandpolymer langsamer abgetragen wird, so daß eine bessere Selektivität des Ätzgrundpolymerabtrags relativ zum Seitenwandpolymerabtrag über einen Ätzschritt hinweg erreicht wird. Infolgedessen können die Ätzschritte sehr vorteilhaft zeitlich verlängert werden, was die Ätzrate und gleichzeitig auch die Anisotropie der Ätzung verbessert. Dies beruht darauf, daß in den Ätzschritten jeweils genau soviel Polymer vorwärtsgesputtert wird, wie zum Erzielen eines optimalen Ätzprofils (senkrechte Wände) benötigt wird. Gleichzeitig wird bei vermindelter Ionenbeschleunigung auch weniger Maskenmaterial abgetragen, so daß damit vorteilhaft auch eine höhere Maskenselektivität erreicht wird.

Schließlich ist das erfindungsgemäße Verfahren insgesamt auch "sanfter", d. h. weniger aggressiv bei Erreichen einer dielektrischen Grenzfläche, da die Ionenenergie nach dem Durchbruch der Ätzgrundpassivierung jedesmal reduziert wird. Somit werden schädliche Auswirkungen der Ionenbombardierung, insbesondere der "Notching-Effekt" mit Taschenbildung infolge von elektrischen Aufladungen und Ionenablenkung in Grenzflächenbereichen, über die verbleibende Zeit des Ätzschrittes reduziert.

Vorteilhaft ist weiterhin, daß durch ein optisches Emissionsspektrometer, das die Fluorkonzentration in dem Plasma als Funktion der Zeit bestimmt, die Dauer der Ätzabschnitte dynamisch kontrolliert und über den Hochfrequenzgenerator geregelt werden kann.

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt es weiterhin vorteilhaft, zwischen den Ätzabschnitten und beim Übergang von Ätzschritten zu den Polymerisationsschritten die

eingekoppelte Hochfrequenzleistung kontinuierlich mit einer Rampenfunktion zu verändern.

Darüberhinaus ist vorteilhaft, daß das erfindungsgemäße Verfahren mit einer Vielzahl von weiteren Prozeßparametern verknüpft und an die jeweiligen Erfordernisse optimiert werden kann. Dazu eignet sich beispielsweise der Prozeßdruck, der Gasfluß der zugeführten Reaktivgase und die Plasmaleistung.

Besonders vorteilhaft ist weiterhin, wenn die zeitliche Veränderung der Ionenbeschleunigungsspannung mit einer Anpassung der Temperatur des zu ätzenden Siliziumkörpers verknüpft ist. Damit läßt sich ein nahezu gleichzeitiger Durchbruch des Ätzgrundpolymers unabhängig von den Aspektverhältnissen der jeweiligen Trenchgräben erreichen.

Zur Veränderung der Ionenbeschleunigungsspannung besteht vorteilhaft eine Vielzahl von Möglichkeiten. Bevorzugt ist eine Modulation der eingekoppelten Hochfrequenzleistung mit einer niederfrequenten Modulationsspannung während der Ätzabschnitte oder die Aufteilung der anliegenden Hochfrequenzleistung bzw. hochfrequenten Wechselspannung in Wechselspannungspulse mit definiert einstellbarem Impuls-Pause-Verhältnis, das in einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung deutlich kleiner als 1 gewählt wird. Hierdurch lassen sich elektrische Aufladungen, die sogenannte "Notching"-Effekte bewirken können, reduzieren.

Die Ionenbeschleunigungsspannung wird in diesem Fall in Form zeitlich sehr kurzer, sehr intensiver Hochfrequenzimpulse mit relativ langen Pausen zwischen den Pulsen bewirkt, wobei der Durchschnittswert der Ionenbeschleunigung unmittelbar über das Impuls-Pause-Verhältnis in einem weiten Bereich einstellbar wird.

Zur Beschleunigung des initialen Ätzgrundpolymerdurchbruchs zu Beginn eines Ätzschrittes ist es weiter vorteilhaft, wenn in dieser Zeit dem Prozeßgas ein chemisch gegenüber dem Ätzgrundpolymer besonders aggressives Gas wie NF_3 oder O_2 zugesetzt wird.

Zeichnung

Die Erfindung wird anhand der Zeichnung und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Die Figur zeigt eine Plasmaätzanlage.

Ausführungsbeispiele

Die Figur zeigt eine Plasmaätzanlage 5 mit einer Ätzkammer 10 in der eine Substratelektrode 12 angeordnet ist, die mit einem zu ätzenden Siliziumkörper 18, insbesondere einem mit einer Ätzmaske strukturierten Siliziumwafer, in Kontakt ist. Weiter ist ein Hochfrequenzgenerator 14 vorgesehen, der eine Hochfrequenzleistung erzeugt, die über die Substratelektrode 12 in den Siliziumkörper 18 eingekoppelt wird. Somit liegt an dem Siliziumkörper 18 über die eingekoppelte Hochfrequenzleistung eine hochfrequente Wechselspannung an. Diese bewirkt als Ionenbeschleunigungsspannung eine Beschleunigung von positiv geladenen, in einem Plasma 28 generierten Ionen, die damit zumindest weitgehend nahezu senkrecht auf die Oberfläche des Siliziumkörpers 18 einfallen. Weiter ist ein Surfatron 16 und ein Hohlleiter 20 vorgesehen. Der Hohlleiter 20 dient zur Einstrahlung oder Einkopplung elektrischer Felder an das Surfatron 16 zur Erzeugung des Plasmas 28, insbesondere elektrischer Hochfrequenzfelder oder bevorzugt elektrischer Mikrowellenfelder. Dem Surfatron 16 werden von oben weiter in an sich bekannter Weise Reaktivgase zugeführt.

Zur Analyse der Zusammensetzung des Plasmas 28 als Funktion der Zeit anhand für die Plasmazusammensetzung typischer Emissionslinien ist weiter ein optisches Emis-

ionsspektrometer 24 vorgesehen, das mit einer Auswerteeinheit 26 in Verbindung steht. Die Auswerteeinheit 26 ist dabei weiter mit einem Sollwerteingang des Hochfrequenzgenerators 14 verbunden, so daß die von dem Hochfrequenzgenerator 14 in den Siliziumkörper 18 eingekoppelte hochfrequente Wechselspannung, die die Ionenbombardierung aus dem Plasma 28 bewirkt, über die Auswerteeinheit 26 als Funktion der über das optische Emissionsspektrometer bestimmten Plasmazusammensetzung geregelt wird. Weiter ist ein Kühlaggregat 30 vorgesehen, das mit einer Substratelektrodenkühlung 32 in Verbindung steht, und über das eine Temperatureinstellung der Substratelektrode 12 und darüber des Siliziumkörpers 18 im Bereich von -30°C bis $+70^\circ\text{C}$ einstellbar ist. Die vom Hochfrequenzgenerator 14 in die Substratelektrode eingekoppelte Hochfrequenzleistung bzw. hochfrequente Wechselspannung kann einerseits eine zeitlich während eines Ätzschrittes in ihrer Amplitude konstante Hochfrequenzleistung oder hochfrequente Wechselspannung sein, sie kann jedoch in bevorzugter Ausgestaltung auch eine getaktete Hochfrequenzleistung bzw. hochfrequente Wechselspannung mit variabel zwischen den Ätzschritten und/oder während eines Ätzschrittes einstellbarem Puls-Pause-Verhältnis sein, wobei die Pulse besonders bevorzugt sehr kurz und intensiv und die Pausen zwischen den Pulsen relativ lang gewählt werden.

Die Plasmaätzanlage 5 und ein damit durchführbares anisotropes Plasmaätzverfahren ist grundsätzlich, abgesehen von dem vorgesehenen Emissionsspektrometer 24, der Auswerteeinheit 26 sowie der darüber geregelten hochfrequenten Wechselspannung bzw. Hochfrequenzleistung an dem Siliziumkörper 18, und der Substratelektrodenkühlung 32, aus DE 42 41 045 C1 bekannt.

Eine Plasmaätzanlage mit einer Vorrichtung zur Kühlung eines Siliziumkörpers während eines anisotropen Ätzprozesses ist weiter in der unveröffentlichten Anmeldung DE 198 41 964.3 bereits vorgeschlagen worden. Aus dieser Anmeldung sind auch weitere Details zur technischen Realisierung der Substratelektrodenkühlung 32 und dem Kühlaggregat 30 zu entnehmen.

Kern der Erfindung ist die gezielte und kontrollierte Modulation der an dem Siliziumkörper 18 effektiv anliegenden Ionenbeschleunigungsspannung über die Zeitdauer der Ätzschritte.

Dazu werden die Ätzschritte jeweils in mindestens zwei Ätzabschnitte unterteilt, wobei in den einzelnen Ätzabschnitten mit gegenüber dem vorausgehenden Ätzabschnitt unterschiedlicher hochfrequenter Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung und somit unterschiedlicher effektiver Ionenbeschleunigung von elektrisch geladenen Teilchen zum Siliziumkörper 18 aus dem Plasma 28 gearbeitet wird.

Die unterschiedlichen Ionenbeschleunigungsspannungen an dem Siliziumkörper 18 werden dazu zumindest zeitweise bevorzugt über entsprechende, unterschiedliche eingekoppelte Hochfrequenzleistungen des Hochfrequenzgenerators 14 erzeugt.

Im einzelnen wird als erstes Ausführungsbeispiel zu Beginn eines jeden Ätzschrittes über den Hochfrequenzgenerator 14 zunächst eine Hochfrequenzleistung oder eine hochfrequente Wechselspannung über die Substratelektrode 12 an den Siliziumkörper 18 angelegt, welche zum raschen Durchbruch eines während eines vorausgehenden Passivier- oder Polymerisationsschrittes erzeugten Ätzgrundpolymers, beispielsweise in bereits geätzten Trenchgräben, ausreichend ist. Nachdem das Ätzgrundpolymer in diesem ersten Ätzabschnitt durchbrochen worden ist, wird dann beispielsweise die Hochfrequenzleistung so weit reduziert, daß einerseits eine erneute Bedeckung des Ätzgrundes mit Polymermaterial verhindert wird, daß diese andererseits aber noch

ausreichend ist zur Aufrechterhaltung des bekannten Seitenwandpolymerfilmtransports, der seinerseits zur Bewahrung der lokalen Anisotropie des Plasmaätzverfahrens in den Ätzschritten notwendig ist.

Ausgehend von einem anisotropen Plasmaätzverfahren für Silizium, wie es beispielsweise aus DE 42 41 045 C1 bekannt ist, ist ein für das erfindungsgemäße Verfahren geeigneter Parametersatz dann durch folgende Einstellungen für die verwendeten Gase, Gasflüsse, Plasmaleistungen, Plasmaleistungen, Dauer der einzelnen Verfahrensschritte und der Größe der eingekoppelten Hochfrequenzleistung bzw. anliegenden hochfrequenten Wechselspannung gegeben:

Passivier- oder Polymerisationsschritt:

100 sccm C_4F_8 bei 10 µbar Druck, 800 Watt Plasmaleistung, 5 Sekunden Dauer des Passivierschritts, keine Hochfrequenzleistung am Siliziumkörper 18 oder der Substratelektrode 12

Ätzschritt:

Gesamtdauer eines Ätzschrittes: 20 Sekunden

erster Ätzabschnitt des Ätzschrittes:

130 sccm SF_6 + 20 sccm O_2 bei 20 µbar Druck, 800 Watt Plasmaleistung, Hochfrequenzleistung von 10 Watt oder Amplitude der hochfrequenten Wechselspannung (13,56 MHz) von 30 bis 50 Volt, Dauer des ersten Ätzabschnittes: 2 Sekunden (Durchbruchphase des Ätzgrundpolymers)

zweiter Ätzabschnitt des Ätzschrittes:

130 sccm SF_6 + 20 sccm O_2 bei 20 µbar Druck, 800 Watt Plasmaleistung, Hochfrequenzleistung von 4 Watt oder Amplitude der hochfrequenten Wechselspannung (13,56 MHz) von 10 bis 20 Volt, Dauer des zweiten Ätzabschnittes: 18 Sekunden (Freihalten des Ätzgrundes von Polymermaterial sowie Vorwärtstreiben des Seitenwandpolymerfilms)

Der genannte Parametersatz ist dabei nur als Beispiel zu verstehen. Geeignete Werte für die Amplitude der hochfrequenten Wechselspannung und der über diese im erläuterten Beispiel vorgegebenen effektiven Ionenbeschleunigungsspannung liegen üblicherweise zwischen 1 Volt und 100 Volt bei einer Frequenz von 1 MHz bis 50 MHz.

In diesem ersten Ausführungsbeispiel wird zunächst die Hochfrequenzleistung innerhalb eines Ätzabschnittes in ihrer Amplitude zeitlich nicht verändert d. h. der Hochfrequenzgenerator 14 wird innerhalb der Ätzabschnitte kontinuierlich bei konstanter Hochfrequenzleistung betrieben und koppelt damit eine zeitlich in ihrer Amplitude innerhalb der Ätzabschnitte konstante hochfrequente Wechselspannung in die Substratelektrode 12 ein.

Die Aufteilung des Ätzschrittes in eine erste, kurze Phase von 2 Sekunden mit einer relativ hohen Spannungsamplitude an der Substratelektrode 12 oder dem Siliziumkörper 18 und eine zweite, lange Phase von 18 Sekunden mit einer relativ niedrigen Spannungsamplitude ergibt sich dabei aus der Beobachtung, daß nach ca. 2 Sekunden unter den angegebenen Bedingungen ein vollständiger Durchbruch des Ätzgrundpolymers erfolgt ist, und daß danach nur noch mit reduzierter effektiver Ionenbeschleunigungsspannung zwischen Plasma 28 und Substratelektrode 12 der Seitenwandfilmtransport sowie die Unterdrückung der Redeposition auf dem Ätzgrund aufrechterhalten werden muß.

Eine vorteilhafte Weiterführung des erläuterten ersten Ausführungsbeispiels ergibt sich dadurch, daß die Plasma-
 5
 10
 15
 20
 25
 30
 35
 40
 45
 50
 55
 60
 65
 70
 75
 80
 85
 90
 95
 100
 105
 110
 115
 120
 125
 130
 135
 140
 145
 150
 155
 160
 165
 170
 175
 180
 185
 190
 195
 200
 205
 210
 215
 220
 225
 230
 235
 240
 245
 250
 255
 260
 265
 270
 275
 280
 285
 290
 295
 300
 305
 310
 315
 320
 325
 330
 335
 340
 345
 350
 355
 360
 365
 370
 375
 380
 385
 390
 395
 400
 405
 410
 415
 420
 425
 430
 435
 440
 445
 450
 455
 460
 465
 470
 475
 480
 485
 490
 495
 500
 505
 510
 515
 520
 525
 530
 535
 540
 545
 550
 555
 560
 565
 570
 575
 580
 585
 590
 595
 600
 605
 610
 615
 620
 625
 630
 635
 640
 645
 650
 655
 660
 665
 670
 675
 680
 685
 690
 695
 700
 705
 710
 715
 720
 725
 730
 735
 740
 745
 750
 755
 760
 765
 770
 775
 780
 785
 790
 795
 800
 805
 810
 815
 820
 825
 830
 835
 840
 845
 850
 855
 860
 865
 870
 875
 880
 885
 890
 895
 900
 905
 910
 915
 920
 925
 930
 935
 940
 945
 950
 955
 960
 965
 970
 975
 980
 985
 990
 995
 1000
 1005
 1010
 1015
 1020
 1025
 1030
 1035
 1040
 1045
 1050
 1055
 1060
 1065
 1070
 1075
 1080
 1085
 1090
 1095
 1100
 1105
 1110
 1115
 1120
 1125
 1130
 1135
 1140
 1145
 1150
 1155
 1160
 1165
 1170
 1175
 1180
 1185
 1190
 1195
 1200
 1205
 1210
 1215
 1220
 1225
 1230
 1235
 1240
 1245
 1250
 1255
 1260
 1265
 1270
 1275
 1280
 1285
 1290
 1295
 1300
 1305
 1310
 1315
 1320
 1325
 1330
 1335
 1340
 1345
 1350
 1355
 1360
 1365
 1370
 1375
 1380
 1385
 1390
 1395
 1400
 1405
 1410
 1415
 1420
 1425
 1430
 1435
 1440
 1445
 1450
 1455
 1460
 1465
 1470
 1475
 1480
 1485
 1490
 1495
 1500
 1505
 1510
 1515
 1520
 1525
 1530
 1535
 1540
 1545
 1550
 1555
 1560
 1565
 1570
 1575
 1580
 1585
 1590
 1595
 1600
 1605
 1610
 1615
 1620
 1625
 1630
 1635
 1640
 1645
 1650
 1655
 1660
 1665
 1670
 1675
 1680
 1685
 1690
 1695
 1700
 1705
 1710
 1715
 1720
 1725
 1730
 1735
 1740
 1745
 1750
 1755
 1760
 1765
 1770
 1775
 1780
 1785
 1790
 1795
 1800
 1805
 1810
 1815
 1820
 1825
 1830
 1835
 1840
 1845
 1850
 1855
 1860
 1865
 1870
 1875
 1880
 1885
 1890
 1895
 1900
 1905
 1910
 1915
 1920
 1925
 1930
 1935
 1940
 1945
 1950
 1955
 1960
 1965
 1970
 1975
 1980
 1985
 1990
 1995
 2000
 2005
 2010
 2015
 2020
 2025
 2030
 2035
 2040
 2045
 2050
 2055
 2060
 2065
 2070
 2075
 2080
 2085
 2090
 2095
 2100
 2105
 2110
 2115
 2120
 2125
 2130
 2135
 2140
 2145
 2150
 2155
 2160
 2165
 2170
 2175
 2180
 2185
 2190
 2195
 2200
 2205
 2210
 2215
 2220
 2225
 2230
 2235
 2240
 2245
 2250
 2255
 2260
 2265
 2270
 2275
 2280
 2285
 2290
 2295
 2300
 2305
 2310
 2315
 2320
 2325
 2330
 2335
 2340
 2345
 2350
 2355
 2360
 2365
 2370
 2375
 2380
 2385
 2390
 2395
 2400
 2405
 2410
 2415
 2420
 2425
 2430
 2435
 2440
 2445
 2450
 2455
 2460
 2465
 2470
 2475
 2480
 2485
 2490
 2495
 2500
 2505
 2510
 2515
 2520
 2525
 2530
 2535
 2540
 2545
 2550
 2555
 2560
 2565
 2570
 2575
 2580
 2585
 2590
 2595
 2600
 2605
 2610
 2615
 2620
 2625
 2630
 2635
 2640
 2645
 2650
 2655
 2660
 2665
 2670
 2675
 2680
 2685
 2690
 2695
 2700
 2705
 2710
 2715
 2720
 2725
 2730
 2735
 2740
 2745
 2750
 2755
 2760
 2765
 2770
 2775
 2780
 2785
 2790
 2795
 2800
 2805
 2810
 2815
 2820
 2825
 2830
 2835
 2840
 2845
 2850
 2855
 2860
 2865
 2870
 2875
 2880
 2885
 2890
 2895
 2900
 2905
 2910
 2915
 2920
 2925
 2930
 2935
 2940
 2945
 2950
 2955
 2960
 2965
 2970
 2975
 2980
 2985
 2990
 2995
 3000
 3005
 3010
 3015
 3020
 3025
 3030
 3035
 3040
 3045
 3050
 3055
 3060
 3065
 3070
 3075
 3080
 3085
 3090
 3095
 3100
 3105
 3110
 3115
 3120
 3125
 3130
 3135
 3140
 3145
 3150
 3155
 3160
 3165
 3170
 3175
 3180
 3185
 3190
 3195
 3200
 3205
 3210
 3215
 3220
 3225
 3230
 3235
 3240
 3245
 3250
 3255
 3260
 3265
 3270
 3275
 3280
 3285
 3290
 3295
 3300
 3305
 3310
 3315
 3320
 3325
 3330
 3335
 3340
 3345
 3350
 3355
 3360
 3365
 3370
 3375
 3380
 3385
 3390
 3395
 3400
 3405
 3410
 3415
 3420
 3425
 3430
 3435
 3440
 3445
 3450
 3455
 3460
 3465
 3470
 3475
 3480
 3485
 3490
 3495
 3500
 3505
 3510
 3515
 3520
 3525
 3530
 3535
 3540
 3545
 3550
 3555
 3560
 3565
 3570
 3575
 3580
 3585
 3590
 3595
 3600
 3605
 3610
 3615
 3620
 3625
 3630
 3635
 3640
 3645
 3650
 3655
 3660
 3665
 3670
 3675
 3680
 3685
 3690
 3695
 3700
 3705
 3710
 3715
 3720
 3725
 3730
 3735
 3740
 3745
 3750
 3755
 3760
 3765
 3770
 3775
 3780
 3785
 3790
 3795
 3800
 3805
 3810
 3815
 3820
 3825
 3830
 3835
 3840
 3845
 3850
 3855
 3860
 3865
 3870
 3875
 3880
 3885
 3890
 3895
 3900
 3905
 3910
 3915
 3920
 3925
 3930
 3935
 3940
 3945
 3950
 3955
 3960
 3965
 3970
 3975
 3980
 3985
 3990
 3995
 4000
 4005
 4010
 4015
 4020
 4025
 4030
 4035
 4040
 4045
 4050
 4055
 4060
 4065
 4070
 4075
 4080
 4085
 4090
 4095
 4100
 4105
 4110
 4115
 4120
 4125
 4130
 4135
 4140
 4145
 4150
 4155
 4160
 4165
 4170
 4175
 4180
 4185
 4190
 4195
 4200
 4205
 4210
 4215
 4220
 4225
 4230
 4235
 4240
 4245
 4250
 4255
 4260
 4265
 4270
 4275
 4280
 4285
 4290
 4295
 4300
 4305
 4310
 4315
 4320
 4325
 4330
 4335
 4340
 4345
 4350
 4355
 4360
 4365
 4370
 4375
 4380
 4385
 4390
 4395
 4400
 4405
 4410
 4415
 4420
 4425
 4430
 4435
 4440
 4445
 4450
 4455
 4460
 4465
 4470
 4475
 4480
 4485
 4490
 4495
 4500
 4505
 4510
 4515
 4520
 4525
 4530
 4535
 4540
 4545
 4550
 4555
 4560
 4565
 4570
 4575
 4580
 4585
 4590
 4595
 4600
 4605
 4610
 4615
 4620
 4625
 4630
 4635
 4640
 4645
 4650
 4655
 4660
 4665
 4670
 4675
 4680
 4685
 4690
 4695
 4700
 4705
 4710
 4715
 4720
 4725
 4730
 4735
 4740
 4745
 4750
 4755
 4760
 4765
 4770
 4775
 4780
 4785
 4790
 4795
 4800
 4805
 4810
 4815
 4820
 4825
 4830
 4835
 4840
 4845
 4850
 4855
 4860
 4865
 4870
 4875
 4880
 4885
 4890
 4895
 4900
 4905
 4910
 4915
 4920
 4925
 4930
 4935
 4940
 4945
 4950
 4955
 4960
 4965
 4970
 4975
 4980
 4985
 4990
 4995
 5000
 5005
 5010
 5015
 5020
 5025
 5030
 5035
 5040
 5045
 5050
 5055
 5060
 5065
 5070
 5075
 5080
 5085
 5090
 5095
 5100
 5105
 5110
 5115
 5120
 5125
 5130
 5135
 5140
 5145
 5150
 5155
 5160
 5165
 5170
 5175
 5180
 5185
 5190
 5195
 5200
 5205
 5210
 5215
 5220
 5225
 5230
 5235
 5240
 5245
 5250
 5255
 5260
 5265
 5270
 5275
 5280
 5285
 5290
 5295
 5300
 5305
 5310
 5315
 5320
 5325
 5330
 5335
 5340
 5345
 5350
 5355
 5360
 5365
 5370
 5375
 5380
 5385
 5390
 5395
 5400
 5405
 5410
 5415
 5420
 5425
 5430
 5435
 5440
 5445
 5450
 5455
 5460
 5465
 5470
 5475
 5480
 5485
 5490
 5495
 5500
 5505
 5510
 5515
 5520
 5525
 5530
 5535
 5540
 5545
 5550
 5555
 5560
 5565
 5570
 5575
 5580
 5585
 5590
 5595
 5600
 5605
 5610
 5615
 5620
 5625
 5630
 5635
 5640
 5645
 5650
 5655
 5660
 5665
 5670
 5675
 5680
 5685
 5690
 5695
 5700
 5705
 5710
 5715
 5720
 5725
 5730
 5735
 5740
 5745
 5750
 5755
 5760
 5765
 5770
 5775
 5780
 5785
 5790
 5795
 5800
 5805
 5810
 5815
 5820
 5825
 5830
 5835
 5840
 5845
 5850
 5855
 5860
 5865
 5870
 5875
 5880
 5885
 5890
 5895
 5900
 5905
 5910
 5915
 5920
 5925
 5930
 5935
 5940
 5945
 5950
 5955
 5960
 5965
 5970
 5975
 5980
 5985
 5990
 5995
 6000
 6005
 6010
 6015
 6020
 6025
 6030
 6035
 6040
 6045
 6050
 6055
 6060
 6065
 6070
 6075
 6080
 6085
 6090
 6095
 6100
 6105
 6110
 6115
 6120
 6125
 6130
 6135
 6140
 6145
 6150
 6155
 6160
 6165
 6170
 6175
 6180

tur frei von Polymermaterial zu halten.

Reicht diese Spannung dazu zeitweilig nicht aus, äußert sich dies sofort in einer Redeposition von Polymermaterial auf dem Ätzgrund, was zu einer Signalveränderung im optischen Emissionsspektrometer 24 führt, die im Fall einer dynamischen Regelung mit der Verarbeitungseinheit 26 über eine Erhöhung der am Siliziumkörper 18 über den Hochfrequenzgenerator 14 anliegenden Wechselspannung sofort kompensiert wird.

Für die Größe der eingekoppelten Hochfrequenzleistung oder die Amplitude der hochfrequenten Wechselspannung in dem zweiten Ätzabschnitt nach Durchbruch des Ätzgrundpolymers gilt dabei allgemein: Sowenig wie möglich, soviel wie nötig. Eine zu geringe Spannung hat eine unbefriedigende Anisotropie zur Folge, während eine zu hohe Spannung einen Verlust an Maskenselektivität, Ätzrate und Anisotropie bedeutet und eine vermehrte Taschenbildung fördert.

Es sei im übrigen betont, daß das Zurückschalten der Hochfrequenzleistung oder der am Siliziumkörper 18 anliegenden hochfrequenten Wechselspannung nicht schlagartig erfolgen muß, sondern auch über eine zeitliche Rampenfunktion, beispielsweise über eine Zeit von 0,5 sec bis 4 sec erfolgen kann. Dabei wird nach dem ersten Ätzabschnitt die Hochfrequenzspannung beispielsweise über eine Zeit von 2 Sekunden reduziert, nach der sie dann den Sollwert des zweiten Ätzabschnittes erreicht und auf diesem gehalten wird.

Ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht vor, daß in Weiterführung des ersten Ausführungsbeispiels in den Passivier- oder Polymerisationsschritten anstelle mit 800 Watt mit relativ hohen Plasmaleistungen von beispielsweise 1500 Watt gearbeitet wird, wobei der Prozeßdruck vorzugsweise im für Passivierung optimalen Druckbereich von 10 µbar bis 20 µbar und der Gasfluß bei 100 sccm bis 200 sccm liegt.

Damit wird erreicht, daß in den Passivierschritten ein besonders widerstandsfähiges, relativ dickes Seitenwandpolymer abgeschieden wird, das im nachfolgenden Ätzschritt aufgrund seiner durch erhöhte Dichte verbesserten chemischen Resistenz besonders stabil hält.

Zusätzlich wird in diesem Ausführungsbeispiel über den Hochfrequenzgenerator 14 auch während der Passivierschritte bereits eine zusätzliche Ionenbeschleunigung durch Anlegen einer Hochfrequenzspannung von beispielsweise 5 Volt bis 20 Volt bzw. einer Hochfrequenzleistung von 2 Watt bis 5 Watt eingesetzt, um bereits während der Passivierschritte einen Transport des abgeschiedenen Seitenwandpolymermaterials in die Tiefe der erzeugten Trenchgräben zu bewirken. Damit werden auch die tieferliegenden Teile der Trenchgräben besonders effektiv mit einem Seitenwandschutzfilm bedeckt, wobei gleichzeitig die Dicke des erzeugten Seitenwandfilms in den oberen Bereichen der Trenchgräben dünner ist als ohne Ionenbeschleunigung und die Dicke des Seitenwandfilms im unteren Teil des Trenchgrabens zunimmt.

Je nachdem, ob die Priorität im erläuterten Ausführungsbeispiel auf der Unterdrückung von sogenannten "Notching-Effekten" d. h. einer unerwünschten Unterätzung oder Profilabweichung an dielektrischen Grenzflächen im zu ätzenden Siliziumkörper 18 oder im Erreichen möglichst hoher Ätzraten beim Ätzprozeß liegt, wird dann auf unterschiedliche Weise in den Ätzschritten weiterverfahren.

Liegt die Priorität auf der Vermeidung von "Notching-Effekten" an dielektrischen Grenzflächen, wird der nachfolgende Ätzschritt relativ schonend durchgeführt d. h. die Plasmaleistung verbleibt beispielsweise auf einem relativ niedrigen Wert von 800 Watt oder wird sogar auf beispiels-

weise 600 Watt reduziert. Dadurch wird die Ionendichte im Plasma 28 insgesamt niedrig gehalten und der Ätzschritt ist wenig aggressiv. Zur weiteren Minimierung von elektrischen Aufladungseffekten wird dazu gleichzeitig auch der Prozeßdruck im Ätzschritt bevorzugt auf 25 µbar bis 40 µbar erhöht.

Nach einem kurzen, sehr intensiven ersten Ätzabschnitt des Ätzschrittes analog dem ersten Ausführungsbeispiel wird dann mit dem Durchbruch des nunmehr sehr widerstandsfähigen Ätzgrundpolymers in einen schonenden, zweiten Ätzabschnitt ebenfalls gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel umgeschaltet, wo dank des nunmehr widerstandsfähigen Seitenwandpolymers eine sehr wirksame Passivierung der Strukturseitenwand jedes "Notching" d. h. Profilabweichungen verhindert.

Dabei wird bevorzugt in dem zweiten Ätzabschnitt zusätzlich der Prozeßdruck der Reaktivgase in der Plasmaätzanlage 5 beispielsweise auf 25 µbar bis 40 µbar nach dem Durchbruch des Ätzgrundpolymers erhöht und damit die Ionendichte, der Ionenfluß und Aufladungseffekte im zweiten Ätzabschnitt nachhaltig reduziert.

Liegt die Priorität dagegen auf der Erzielung einer möglichst hohen Ätzrate, wird zum Erreichen einer möglichst hohen Dichte Silizium ätzender Fluorradikale eine möglichst hohe Leistung in den Ätzzyklen eingesetzt. Dazu wird die Plasmaleistung im Ätzschritt über die Leistung im Passivierschritt hinaus auf Werte von 3000 Watt bis 5000 Watt erhöht, wobei bevorzugt mit einem möglichst hohen Prozeßdruck von beispielsweise 40 µbar bis 100 µbar die Dichte freier Fluorradikale weiter gesteigert wird. Dieser hohe Prozeßdruck bewirkt zusätzlich eine Absenkung der Ionendichte im Ätzschritt, was durch Reduktion des Ionenstroms zum Siliziumkörper 18 schädliche Aufladungseffekte vermindert und damit die Profilkontrolle verbessert.

Insgesamt wird ansonsten auch in dieser Verfahrensvariante zunächst entsprechend dem ersten Ausführungsbeispiel in einem kurzen, aggressiven ersten Ätzabschnitt des Ätzschrittes der Ätzgrund von zuvor deponiertem Polymermaterial befreit, während der nachfolgenden Ätzabschnitt die beschriebene, bezüglich des Seitenwandpolymermaterials schonendere Prozeßführung beinhaltet. Durch die Abscheidung eines besonders robusten Seitenwandpolymermaterials während des Passivierschrittes hält dieses dabei dem fluorreichen Ätzschritt besonders gut stand, so daß entsprechend tief und mit hoher Rate geätzt werden kann.

Ein drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht, in Weiterführung des ersten oder zweiten Ausführungsbeispiels zusätzlich vor, den Durchbruch durch das Ätzgrundpolymer in allen Trenchgräben unabhängig von deren Breite oder Tiefe zu Breite-Verhältnis (Aspektverhältnis) durch gezielte Einstellung der Temperatur des Siliziumkörpers 18 in etwa gleichzeitig ablaufen zu lassen.

Im allgemeinen ist die Polymerabtragsgeschwindigkeit in schmalen Trenchgräben langsamer als in den breiten Trenchgräben, da mit zunehmenden Aspektverhältnis (Tiefe zu Breite-Verhältnis) ein immer geringerer Teil der aus dem Plasma 28 einfallenden Ionen bis zum Ätzgrund gelangt. Dieser Effekt führt unter anderem zu einer generellen Abnahme der Ätzrate in schmalen Trenchgräben gegenüber breiten, was als "RIE-Lag" bezeichnet wird. Andererseits ist aber auch der Transport von Spezies, beispielsweise polymerbildenden Monomeren, in die Tiefe der Trenchgräben zunehmend schwieriger mit wachsendem Aspektverhältnis, d. h. es erreichen immer weniger polymerbildende Monomere den Ätzgrund, was schließlich zur Folge hat, daß schmale Trenchgräben mit einem dünneren Ätzgrundpolymer belegt werden als breite.

Im erläuterten Beispiel wird daher der ioneninduzierte

Abtrag des Ätzgrundpolymers zusätzlich durch eine Veränderung der Substrattemperatur in einem Bereich von -30°C bis $+70^{\circ}\text{C}$ derart eingestellt, daß für alle geätzten Strukturen in dem Siliziumkörper 18, weitgehend unabhängig von deren Aspektverhältnis, nahezu gleiche Ätzraten erreicht werden. Damit wird durch die Einstellung der Temperatur des Siliziumkörpers 18 über die Substratelektrode 12 und die Substratelektrodenkühlung 32 beispielsweise ein annähernd gleichzeitiger Durchbruch des Ätzgrundpolymers im ersten Ätzabschnitt eines jeden Ätzschrittes für alle Strukturbreiten erreicht.

Die günstigste Temperatureinstellung wird dazu bevorzugt in einigen Vorversuchen mittels Teststützen an Siliziumkörpern, die beispielsweise analog den später im Betrieb der Ätzanlage 5 zu prozessierenden Siliziumkörpern 18 strukturiert sind, unter Einsatz des beschriebenen optischen Emissionsspektrometers 24 oder mittels eines Reflektometers bestimmt. Dies geschieht, indem in den Vorversuchen über das optische Emissionsspektrometer 24 der Durchbruch durch das Ätzgrundpolymer in den Siliziumkörpern 18 über eine Variation der Temperatur des Siliziumkörpers beispielsweise auf einen möglichst steilen Abfall des Fluorsignals oder möglichst steilen Anstieg des Siliziumtetrafluoridsignals hin optimiert wird.

Je geringer die Unterschiede der erforderlichen Durchbruchzeit des Ätzgrundpolymers zwischen unterschiedlich breiten Trenchgräben oder geätzten Strukturen mit unterschiedlichem Aspektverhältnis auf dem Siliziumkörper 18 daher sind, umso steiler erfolgt der Abfall des Fluorsignals im optischen Emissionsspektrometer 24. Damit ist über die Variation der Temperatur des Siliziumkörpers 18 durch die Substratelektrodenkühlung 32 und die Maximierung des Abfalles des Fluorsignals eine Optimierungsstrategie zum Erreichen eines möglichst gleichzeitigen Durchbruchs des Ätzgrundpolymers in unterschiedlichen Strukturen definiert.

Als besonders günstig haben sich Temperaturen von -10°C bis $+30^{\circ}\text{C}$, bevorzugt $+10^{\circ}\text{C}$ herausgestellt.

Ein viertes, besonders vorteilhaftes Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht vor, daß das im ersten Ausführungsbeispiel beschriebene Zurückschalten der Hochfrequenzleistung oder der hochfrequenten Wechselspannung des Hochfrequenzgenerators 14 nach dem Durchbruch des Ätzgrundpolymers, d. h. zu Beginn und während des zweiten Ätzabschnittes in den Ätzschritten dadurch erreicht wird, daß die über den Hochfrequenzgenerator 14 erzeugte, am Siliziumkörper 18 anliegende hochfrequente Wechselspannung oder eingekoppelte Hochfrequenzleistung mit einem zusätzlichen niederfrequenten Modulationssignal so moduliert wird, daß die sogenannte "Hüllkurve" der hochfrequenten Wechselspannung, d. h. die Verbindungslinie der Wechselspannungsamplituden durch den momentanen Wert der niederfrequenten Modulationsspannung definiert ist. Das niederfrequente Modulationssignal aus einem zusätzlich vorgesehenen, an sich bekannten Niederfrequenzgenerator wird hierzu in einen zur Amplitudenmodulation vorgesehenen Eingang des Hochfrequenzgenerators 14 eingespeist. Viele kommerziell erhältliche Hochfrequenzgeneratoren sind mit einem entsprechenden Modulationseingang ausgestattet, so daß diese Funktion vorteilhaft im Sinne dieser Erfindung genutzt werden kann.

Eine solche Amplitudenmodulation (AM), die sich dann auch entsprechend auf die effektive Ionenbeschleunigungsspannung zwischen Substratelektrode 12 und Plasma 28 überträgt, ist dem Fachmann in der Hochfrequenztechnik an sich bekannt. Im einfachsten Fall erhält man dieses amplitudenmodulierte Hochfrequenzsignal aus einer Multiplikation der hochfrequenten Wechselspannung als Trägerspannung

mit dem niederfrequenten Modulationssignal. Die hochfrequente Wechselspannung hat dazu, wie erläutert, beispielsweise eine Frequenz von 1 MHz bis 50 MHz, während die niederfrequente Modulationsspannung eine bevorzugte Frequenz von 50 Hz bis 1 MHz, besonders bevorzugt 200 Hz bis 10 kHz, hat.

Der zeitliche Spannungsverlauf der niederfrequenten Modulationsspannung weist dabei einen rechteckförmigen oder rechteckimpulsförmigen, zumindest abschnittsweise dreieckförmigen oder, bevorzugt, einen zumindest abschnittsweise sinusförmigen Verlauf auf.

Einem rechteckförmigen oder rechteckimpulsförmigen Verlauf der niederfrequenten Modulationsspannung entspricht nach der Multiplikation mit der hochfrequenten Wechselspannung dann ein periodisches Ein- und Ausschalten der vom Hochfrequenzgenerator 14 abgegebenen Hochfrequenzleistung mit der Frequenz der Modulationsspannung. Alternativ verfügen viele kommerziell erhältliche Hochfrequenzgeneratoren über einen speziell zur Modulation mit einem rechteckförmigen Niederfrequenzsignal vorgesehenen Eingang, einen sogenannten "Burst"-Eingang: Solange an diesem "Burst"-Eingang ein oberhalb eines Schwellwerts von beispielsweise 1 V liegender Pegelwert anliegt, wird entsprechend vom Hochfrequenzgenerator 14 eine hochfrequente Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung des gewünschten, voreingestellten Sollwertes erzeugt. Bei einem Pegelwert unterhalb dieses Schwellwerts, beispielsweise bei einem Pegelwert 0 V, wird vom Hochfrequenzgenerator 14 keine hochfrequente Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung erzeugt. Dieser Steuerung des Hochfrequenzgenerators 14 entspricht ein periodisches Ein- und Ausschalten des Hochfrequenzgenerators 14 mit der Frequenz der niederfrequenten Modulationsspannung.

Der Vorteil eines Burst-Eingangs gegenüber gewöhnlichen Ein- und Ausschaltvorgängen besteht in besonders schnell und reproduzierbar ablaufenden Schaltvorgängen.

Im einzelnen wird im erläuterten Ausführungsbeispiel während eines ersten Ätzabschnittes eines Ätzschrittes, d. h. bis zum Durchbruch des Ätzgrundpolymers, zunächst über den Hochfrequenzgenerator 14 eine hochfrequente Wechselspannung mit konstanter Amplitude d. h. ohne eine zusätzliche Modulation an den Siliziumkörper 18 angelegt. Nach dem Durchbruch des Ätzgrundpolymers, der analog den vorausgehenden Ausführungsbeispielen beispielsweise mittels des optischen Emissionsspektrometers 24 bestimmt wird, und der somit dynamisch die Zeitdauer des ersten Ätzabschnittes bestimmt, wird dann in einem zweiten Ätzabschnitt mit einer reduzierten effektiven Ionenbeschleunigung weitergearbeitet.

Dazu werden in diesem zweiten Ätzabschnitt durch eine entsprechende zusätzlich erzeugte niederfrequente Modulationsspannung, mit der die eigentliche hochfrequente Wechselspannung in an sich bekannter Weise moduliert wird, hochfrequente Schwingungspakete oder Hochfrequenzimpulse mit einer beispielsweise rechteckförmigen, rechteckimpulsförmigen oder abschnittsweise annähernd sinusförmigen Einhüllenden in zeitlichem Abstand periodisch auf die Substratelektrode 12 bzw. den Siliziumkörper 18 gegeben.

Im einfachsten Fall weist die Einhüllende der hochfrequenten Wechselspannungspulse in diesem zweiten Ätzabschnitt einen sinusförmigen Verlauf auf, so daß sich die effektive Ionenbeschleunigungsspannung, auf die sich diese Modulation überträgt, gegenüber dem ersten Ätzabschnitt halbiert.

Eine Absenkung der effektiven Ionenbeschleunigung im zweiten Ätzabschnitt läßt sich zusätzlich oder alternativ durch einen größeren zeitlichen Abstand der hochfrequenten

Wechselspannungspulse voneinander oder durch eine zeitliche Verkürzung der Dauer der Wechselspannungspulse erreichen. Entsprechend dem jeweiligen über den zeitlichen Abstand und die zeitliche Dauer der hochfrequenten Wechselspannungspulse definierten "Impuls-Pause-Verhältnis" nimmt dann auch die effektive Ionenbeschleunigungsspannung zur Substratelektrode 12 und damit zum zu ätzenden Siliziumkörper 18 zu oder ab. Typische Impuls-Pause-Verhältnisse liegen zwischen 0,01 bis 1. Besonders bevorzugt sind Impuls-Pause-Verhältnisse zwischen 0,05 und 0,2.

Das erläuterte Verfahren zur Veränderung der effektiven Ionenbeschleunigungsspannung im zweiten Ätzabschnitt mittels einer zusätzlichen, in ihrer Frequenz einstellbaren, relativ niederfrequenten Modulationsspannung sowie einem variabel einstellbaren Impuls-Pause-Verhältnis ist offensichtlich auch zur Einstellung der effektiven Ionenbeschleunigung im ersten Ätzabschnitt geeignet und dort sehr vorteilhaft.

So können beispielsweise unterschiedliche Ionenbeschleunigungsspannungen in den verschiedenen Ätzabschnitten oder Prozeßschritten des erfindungsgemäßen Ätzverfahrens auch dadurch erreicht werden, daß eine zeitlich hinsichtlich ihrer Amplitude unveränderte hochfrequente Wechselspannung oder eingekoppelte Hochfrequenzleistung des Hochfrequenzgenerators 14 verwendet wird, daß diese Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung dann aber über die, zusätzliche niederfrequente Modulationsspannung zumindest zeitweise mit unterschiedlichen Frequenzen oder Signalförmigkeiten moduliert wird, oder unterschiedliche Impuls-Pause-Verhältnisse aufweist. Speziell im Fall eines rechteckförmigen Impulsverlaufs kann der Hochfrequenzgenerator 14 auf diese Weise unter Verwendung seines "Burst"-Eingangs mit einer niederfrequenten Rechteckspannung mit variablem Impuls-Pause-Verhältnis periodisch ein- und ausgeschaltet ("gepulst") werden. Damit werden Hochfrequenzimpulse mit einer annähernd rechteckförmigen Einhüllenden generiert, die ein einstellbares Impuls-Pause-Verhältnis aufweisen, das bevorzugt deutlich kleiner als 1 ist und insbesondere zwischen 0,2 und 0,01 liegt.

Durch den Einsatz von hochfrequenten Wechselspannungspulsen während des zweiten Ätzabschnittes in den Ätzschritten wird somit der Ätzgrund während der Dauer dieser Pulse immer wieder freigeräumt und auch nur in diesen Phasen ein Vorwärtstreiben des Seitenwandpolymerfilms bewirkt. In der Zeit zwischen zwei Pulsen findet dann zwar eine gewisse (Re-)Deposition auf dem Ätzgrund und auch ein gewisser Seitenwandangriff infolge Fehlens eines Vorwärtssputtereffekts an der Seitenwand, d. h. geringer lokaler Anisotropie, statt, der nächste hochfrequente Wechselspannungspuls räumt den Ätzgrund dann aber wieder frei und gewährleistet auch ein Vorwärtstreiben des Seitenwandpolymerfilms weiter in den Trenchgraben hinein.

Da nach dem ersten Entfernen des initialen Polymerfilms am Ätzgrund zu Beginn eines jeden Ätzschrittes im ersten Ätzabschnitt nur noch zufällige Redepositionen vom Ätzgrund zu beseitigen sind, ist ein derartiger Einsatz von nur relativ kurzen, dafür aber jeweils intensiven Wechselspannungspulsen während des zweiten Ätzabschnittes jedoch vielfach ausreichend.

Die Prozeßführung mit einer niederfrequenten Modulation der hochfrequenten Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung und/oder einem definiert eingestellten Impuls-Pause-Verhältnis der hochfrequenten Wechselspannungspulse während der einzelnen Ätzabschnitte hat gegenüber den übrigen Ausführungsbeispielen den sehr wesentlichen zusätzlichen Vorteil, daß innerhalb der Pulspausen d. h. keine anliegende Ionenbeschleunigungsspannung oder nur geringen effektiven Ionenbeschleunigungsspannungen

in dem Siliziumkörper 18 jeweils eine Entladung von zuvor unvermeidlich induzierten Aufladungen ermöglicht wird.

Besonders bevorzugt zur Vermeidung von induzierten Aufladungen ist dabei die Verwendung möglichst kurzer, intensiver Hochfrequenzimpulse, d. h. kurzer Hochfrequenzimpulse mit hohen Spannungsamplituden und relativ langen Pausen zwischen den einzelnen Hochfrequenzimpulsen. In diesem Fall findet während der kurzen Dauer der intensiven Impulse, die die einfallenden Ionen kurzzeitig auf hohe Ionenenergien beschleunigen, zunächst nur eine geringe Aufladung eines beispielsweise dielektrischen Ätzgrunds statt.

Diese, an sich bereits geringe Aufladung wird dann in den relativ langen Pausen zwischen den einzelnen Hochfrequenzimpulsen weiter zusätzlich über Entladung reduziert, bevor der nächste kurze Hochfrequenzimpuls mit entsprechend hoher Ionenbeschleunigung folgt. Für eine derartige Modulation mit möglichst kurzen Hochfrequenzimpulsen und langen Pausen zwischen den Pulsen wird bevorzugt eine niederfrequente Wiederholfrequenz von 50 Hz bis 10 kHz eingesetzt.

Im übrigen ist es selbstverständlich möglich, die vorhergehend beschriebene Modulation der hochfrequenten Wechselspannung und die Variation des Impuls-Pause-Verhältnisses miteinander zu kombinieren.

Ein fünftes Ausführungsbeispiel sieht weiter vor, einen zweiten, zusätzlichen Hochfrequenzgenerator einzusetzen, der analog dem Hochfrequenzgenerator 14 aufgebaut ist und ebenfalls mit der Substratelektrode 12 in Verbindung steht, und der im ersten Ätzabschnitt jeweils auf das Signal des Hochfrequenzgenerators 14 aufgeschaltet wird. Dieser zweite zusätzliche Generator wird dabei bevorzugt derart betrieben, daß er dem Signal des Hochfrequenzgenerators 14 kurze Hochfrequenzimpulse mit niedrigen Impuls-Pause-Verhältnis überlagert.

Weiter ist es in diesem Fall vorteilhaft, wenn beide Hochfrequenzgeneratoren auf unterschiedlichen Frequenzen, beispielsweise auf 2 MHz und 13,56 MHz, arbeiten, so daß der Hochfrequenzgenerator 14 durchgehend betrieben wird und der zweite Hochfrequenzgenerator nur während sogenannter "Burst-Phasen" zugeschaltet wird, die beispielsweise dem Durchbruch des Ätzgrundpolymers dienen.

Durch die Verwendung unterschiedlicher Frequenzen für beide Generatoren wird in einfacher Weise eine elektrische Isolation der Generatoren gegeneinander durch zugeordnete, unterschiedlich abgestimmte Anpassnetzwerke erreicht, und somit eine gegenseitige Leistungseinkopplung der Generatoren ineinander vermieden.

Im übrigen lassen sich die vorstehenden Ausführungsbeispiele auch mit einer zumindest zeitweiligen Zugabe eines, chemisch besonders aggressiv gegenüber dem Ätzgrundpolymer wirkenden Gases, beispielsweise O_2 oder bevorzugt NF_3 , kombinieren, wobei dieses besonders aggressive Gas mit einem Gasfluß von 2 sccm bis 20 sccm bevorzugt lediglich während des ersten Ätzabschnittes zur Unterstützung eines möglichst schnellen Ätzgrundpolymerdurchbruchs eingesetzt und nach erfolgtem Durchbruch während des zweiten Ätzabschnittes dann nicht mehr dem Prozeßgas zugesetzt wird.

Die vorstehenden Ausführungsbeispiele erläutern das erfindungsgemäße Verfahren am Beispiel der anisotropen Ätzung von Silizium. Das Verfahren ist jedoch nicht auf Silizium beschränkt, sondern eignet sich, teilweise verbunden mit einer dem Fachmann an sich bekannten Anpassung der Prozeßparameter und Reaktivgase, auch für andere Halbleitermaterialien wie beispielsweise Ge, GaAs, AlN, und GaP.

Bezugszeichenliste

5 Plasmaätzanlage	
10 Ätzkammer	
12 Substratelektrode	5
14 Hochfrequenzgenerator	
16 Surfatron	
18 Siliziumkörper	
20 Resonator	
24 optisches Emissionsspektrometer	10
26 Auswerteeinheit	
28 Plasma	
30 Kühlaggregat	
32 Substratelektrodenkühlung	15

Patentansprüche

1. Verfahren zum anisotropen Ätzen von Strukturen in einem Halbleiterkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einem Siliziumkörper (18), mittels eines Plasmas (28), wobei an dem Halbleiterkörper zumindest während eines über eine vorgegebene Zeitdauer andauernden Ätzschrittes eine Ionenbeschleunigungsspannung zwischen dem Plasma (28) und dem Halbleiterkörper angelegt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Zeitdauer des Ätzschrittes in mindestens zwei Ätzabschnitte unterteilt wird, zwischen denen die angelegte Ionenbeschleunigungsspannung jeweils verändert wird. 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Halbleiterkörper ein strukturierter Siliziumwafer verwendet wird, der mit einer Substratelektrode (12) in Verbindung steht. 25
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die anliegende Ionenbeschleunigungsspannung von einer an der Substratelektrode (12) anliegenden hochfrequenten Wechselspannung hervorgerufen wird, die eine Amplitude zwischen 1 Volt und 200 Volt, insbesondere von 10 Volt bis 70 Volt, und eine Frequenz von 1 MHz bis 50 MHz hat. 30
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die hochfrequente Wechselspannung mit mindestens einem Hochfrequenzgenerator (14) erzeugt wird, der in den Halbleiterkörper eine Hochfrequenzleistung einkoppelt, und daß die eingekoppelte Hochfrequenzleistung entsprechend der sich während der Ätzschritte verändernden hochfrequenten Wechselspannungen verändert wird. 35
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeitdauer des Ätzschrittes in zwei Zeitabschnitte unterteilt wird, wobei während des ersten Ätzabschnittes eine höhere hochfrequente Wechselspannung und/oder eine höhere Hochfrequenzleistung verwendet wird, als während des zweiten Ätzabschnittes. 40
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß während des ersten Ätzabschnittes eine hochfrequente Wechselspannung mit einer Amplitude von 20 Volt bis 70 Volt und während des zweiten Ätzabschnittes eine hochfrequente Wechselspannung mit einer Amplitude von 10 Volt bis 20 Volt eingesetzt wird. 45
7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ätzschritte alternierend mit Passivierschritten durchgeführt werden, wobei die anliegende Ionenbeschleunigungsspannung während der Passivierschritte abgeschaltet oder zumindest deutlich reduziert wird. 50
8. Verfahren nach Anspruch 1 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest die Länge des ersten Ätzabschnittes während eines Ätzschrittes mittels einer Vorrichtung zur Detektion eines Polymerdurchbruchs, insbesondere eines Ätzgrundpolymerdurchbruchs, bestimmt wird. 55
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß als Vorrichtung zur Detektion des Polymerdurchbruchs ein optisches Emissionsspektrometer (24), ein Laserinterferometer oder ein Reflektometer eingesetzt wird, das kontinuierlich oder stichpunktartig eine den Ätzgrundpolymerdurchbruch charakterisierende physikalische Meßgröße bestimmt. 60
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest die Zeitdauer des ersten Ätzabschnittes statisch über Vorversuche oder kontinuierlich und dynamisch bestimmt wird, wobei die Vorrichtung zur Detektion des Polymerdurchbruchs über den Hochspannungsgenerator (14) die Größe der an dem Halbleiterkörper anliegenden hochfrequenten Wechselspannung und/oder Hochfrequenzleistung als Funktion der Zeit regelt. 65
11. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorrichtung zur Detektion des Polymerdurchbruchs die Zeitdauer des ersten Ätzabschnittes dynamisch anhand des erfolgten Polymerdurchbruchs bestimmt und regelt.
12. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vorrichtung zur Einstellung der Temperatur des Halbleiterkörpers vorgesehen ist, mit der die Temperatur des Halbleiterkörpers derart eingestellt wird, daß eine Änderung der den Ätzgrundpolymerdurchbruch charakterisierenden physikalischen Meßgröße pro Zeiteinheit maximal wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur des Halbleiterkörpers in einem Bereich von -30°C bis +70°C derart eingestellt wird, daß ein Polymerdurchbruch, insbesondere ein Ätzgrundpolymerdurchbruch, zumindest weitgehend unabhängig vom Aspektverhältnissen der geätzten Strukturen, insbesondere geätzter Trenchgräben, erfolgt.
14. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Änderung der angelegten Ionenbeschleunigungsspannung zwischen den Ätzabschnitten und/oder den Ätzschritten und den Passivierschritten abrupt oder kontinuierlich unter Einsatz einer zeitlichen Rampenfunktion erfolgt.
15. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß neben der angelegten Ionenbeschleunigungsspannung zwischen den Ätzabschnitten und/oder zwischen den Ätzschritten und den Passivierschritten weiterhin der Prozeßdruck und/oder die Plasmaleistung und/oder der Gasfluß und/oder die Zusammensetzung des eingesetzten Reaktivgases verändert wird.
16. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Amplitude der anliegenden hochfrequenten Wechselspannung oder der eingekoppelten Hochfrequenzleistung mit einem niederfrequenten Modulationssignal aus einem Niederfrequenzgenerator moduliert, getaktet oder gepulst wird.
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß das niederfrequente Modulationssignal eine Frequenz von 50 Hz bis 1 MHz hat und einen rechteckförmigen, rechteckimpulsförmigen, zumindest

abschnittsweise dreieckförmigen oder zumindest abschnittsweise sinusförmigen Signalverlauf aufweist.

18. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß das niederfrequente Modulationssignal ein Rechtecksignal oder Rechteckimpulssignal mit einstellbarem, zumindest zwischen den Ätzabschnitten unterschiedlichem Puls-Pause-Verhältnis ist, das die Amplitude der eingekoppelten Hochfrequenzleistung taktet, und das der anliegenden Ionenbeschleunigungsspannung ein entsprechendes Puls-Pause-Verhältnis aufprägt.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Puls-Pause-Verhältnis zwischen 0,01 und 1, insbesondere zwischen 0,01 und 0,2 liegt.

20. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß dem Plasma (28) zumindest zeitweilig, insbesondere während des ersten Ätzabschnittes, ein chemisch gegenüber dem Ätzgrundpolymer aggressives Gas zugesetzt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

